

星形衍生多胞薄壁管的动态压缩

刘英志,何玉龙,王志华

(太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所,030024 太原)

摘要:多胞薄壁管具有成本低、比强度高、吸能效率高等特点,被广泛用作于能量吸收装置。本研究通过实验验证了有限元模型的准确性,研究了截面拓扑、壁厚梯度对星形衍生多胞薄壁管能量吸收的影响。结果表明:多边形基星形衍生薄壁管边数的增加会降低结构的耐撞性与稳定性;同时,二阶五边形基星形衍生薄壁管具有最大的比吸能及平均压缩力;另外,负梯度结构可以在保留结构拓扑和功能的条件下显著提高结构的耐撞性。

关键词:多胞薄壁管;截面拓扑;动态压缩;能量吸收

中图分类号:O347.1 **文献标志码:**A

Dynamic compression of star-inspired multi-cell thin-walled tubes

LIU Yingzhi, HE Yulong, WANG Zhihua

(Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering,
Taiyuan University of Technology, 030024 Taiyuan, China)

Abstract: Multi-cell thin-walled tubes have been widely used in energy absorption devices for their low cost, high specific strength, and high energy absorption efficiency. In this paper, the accuracy of the finite element model is verified by experiments, and the influence of section topology and wall thickness gradient on the energy absorption of the star-derived multi-cell thin-walled tube is studied. The results show that the crashworthiness and stability of the structure are reduced with the increase of the number of sides of the polygon-based star-inspired structure. Meanwhile, the second-order star-inspired thin-walled tube derived from the pentagon has the largest specific energy absorption and mean crushing force. In addition, the negative gradient structure can significantly improve the crashworthiness of the structure while retaining the topology and function of the structure.

Key words: multi-cell thin-walled tube; sectional topology; dynamic compression; energy absorption

为了满足结构耐撞性和轻量化要求^[1],多胞薄壁结构^[2-4]因其具有参数可设计、成本低、比强度高、可加工性强等优异性能,被广泛用作于能量吸收装置。文献[5]对单胞、三胞及泡沫填充多胞薄壁管进行了理论分析及数值模拟,结果表明,在薄壁管中

填充泡沫芯比起未填充泡沫芯的单胞及三胞薄壁管可分别提高 30% 及 40% 的比吸能。文献[6]提出了关于方管及多边形薄壁管轴向压缩的经典理论,根据其屈曲模式推导出了平均压缩载荷的解析解。文献[7]基于超折叠单元理论及有限元模拟,分别分

收稿日期:2021-01-16

修回日期:2022-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11772216;11902215)

通信作者:王志华。E-mail: wangzh077@163.com

引用格式:刘英志,何玉龙,王志华. 星形衍生多胞薄壁管的动态压缩[J]. 应用力学学报, 2022, 39(4): 758-765.

LIU Yingzhi, HE Yulong, WANG Zhihua. Dynamic compression of star-inspired multi-cell thin-walled tubes[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(4): 758-765.

式中 A 是星形衍生薄壁管外壁直径为 35 mm 时所对应的定值。

基于正多边形基星形结构中的多边形与其外接圆具有等质量可得

$$na_n \cdot t_{n-1} = 2\pi \cdot Rt_{n-6} \tag{5}$$

$$nb_n \cdot t_{n-2} = 2\pi \cdot rt_{n-4} \tag{6}$$

对于所有二阶结构,其与一阶结构一致的地方均按一阶结构的尺寸设定,内部填充的子结构设置为相同的质量,根据多边形的边数,内部子结构的壁厚为

$$B = (nc_n + 2nl_n) t_{n-3} \tag{7}$$

式中: B 是星形衍生薄壁管的二阶结构的所对应的定值; c_n 及 l_n 为图 2 中标注的多边形的边长,这里 n 为多边形的边数。

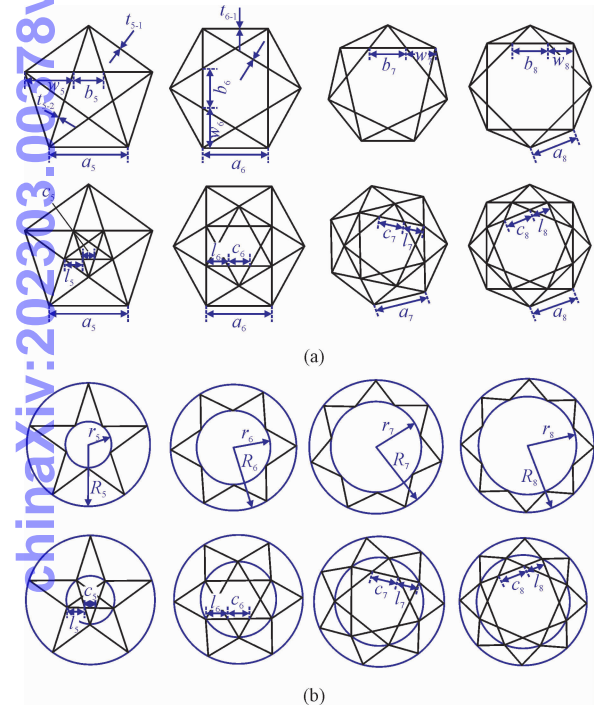


图 2 星形衍生薄壁管的横截面尺寸

Fig. 2 Cross-sectional dimensions of star-inspired thin-walled tubes

2 实验及有限元验证

2.1 试样制备及参数测定

为了验证有限元模型的准确性,制造了星形衍生薄壁管 P-P₁,并对其进行落锤冲击实验。试样的制造过程如下:首先,在铣床上将高度为 110 mm 的

AL6061-O 铝锭铣平;然后,根据模型肋板的分布。在铝锭上适当的位置钻取通孔;随后,将钼丝穿过通孔并采用电火花线切割技术加工制成了 P-P₁薄壁管;最后,在热处理炉里以 560 ℃ 的条件保温 2 h 并水淬。为了获得该结构的动态冲击响应,采用图 3 所示 DHR940 落锤试验机对试样 P-P₁进行动态压缩实验。该系统工作原理:基于能量守恒原理,通过调节锤头高度来获得不同的冲击速度。根据冲击速度确定锤头的高度后,将锤头通过自锁装置提升到一定的高度,释放锤头使其沿光滑导轨下落冲击试样。在锤头与试样碰撞的瞬间触发高速相机,采用数字图像相关法(digital image correlation, DIC)获得试样的应变场。同时,通过示波器实时采集力传感器的力-时间曲线。本实验中,锤头的总质量为 130.81 kg,锤头的直径为 80 mm,通过调节锤高获得的锤头初速度为 10 m/s。力传感器的最大承载力为 2 000 kN,高速相机的频率为 10 000 s⁻¹,采样分辨率为 1 280 × 1 024。

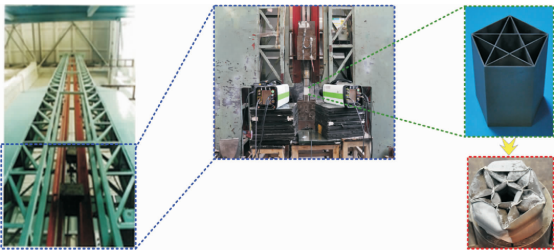


图 3 DHR940 落锤试验机

Fig. 3 Drop testing machine of DHR940

2.2 有限元模型验证

采用有限元软件 Abaqus/Explicit 对星形衍生薄壁管 P-P₁的动态冲击响应进行了数值模拟,建立的有限元模型如图 4(a)所示。在动态加载模拟中,试样保持垂直状态,位于两刚性面板之间;下面板静止不动,上面板沿垂直方向以 10 m/s 的速度压缩试样。其次,上下刚性面板采用 C3D8R 实体单元,试样采用 S4R 壳单元;所有接触都设置为通用接触,摩擦系数设置为 0.2。图 4(c)给出了星形衍生薄壁管所用 AL6061-O 铝合金的标准拉伸试验 (ASTM-E8M-04) 及试件尺寸示意图,拉伸速度为 2 mm/min,经处理得到的真实应力-应变曲线如图 4(b)所示。AL6061-O 铝合金的力学性能如下:杨氏模量 $E =$

70 GPa,泊松比 $\nu=0.28$,密度 $\rho=2\,580\text{ kg/m}^3$,初始屈服应力 119 MPa,极限应力 245 MPa。由于铝合金是一种应变率不敏感材料,本研究中未考虑材料的应变率效应。图 4(d) 所示的网格收敛性测试表明 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的网格足以保证计算的精度,降低计算所用的时间。图 4(e) 给出了 P-P₁ 管的实验与有限

元结果对比图,从图 4(e) 中能够看出,实验中到达初始峰值力的时间略早于有限元模拟,并且实验中的初始峰值力值低于有限元模拟^[12],这是因为在实验中上下板与试件的摩擦以及试验件的制造误差,但 2 条曲线的变化趋势相同,产生波峰及波谷的数目相同,从而验证了有限元模型的正确性。

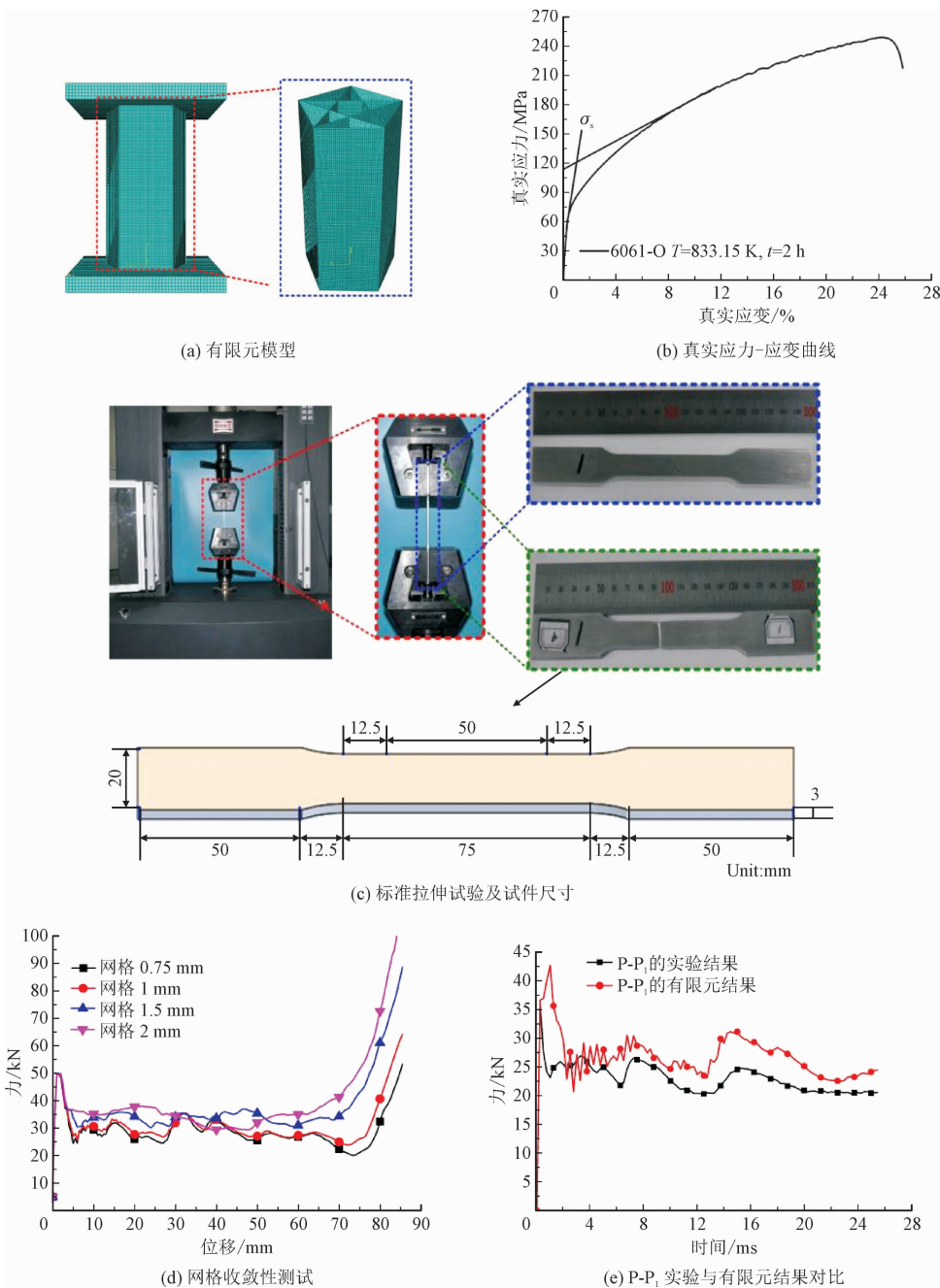


图 4 有限元模型及有效性验证

Fig. 4 Finite element model and validation

2.3 实验与有限元结果验证

图 5 给出了 P-P₁模型动态冲击过程中实验变形的位移云图与数值模拟的应变云图。从图 5 中能够看出,实验结果与数值模拟结果都是经历了从中部出现褶皱,随后沿试样的两端非对称的渐进折叠直至试样密实化。不同的是实验中间,褶皱倾向于向

上边缘发展,数值模拟中中间褶皱倾向于朝下边缘发展,这可能是由于在实验过程中,实验试件与上下面板之间摩擦的差异及试样的制造误差,但实验与有限元模拟中形成的褶皱数目相同,并且实验件与有限元模型最终状态图也基本相同,进而验证了有限元模型的正确性。

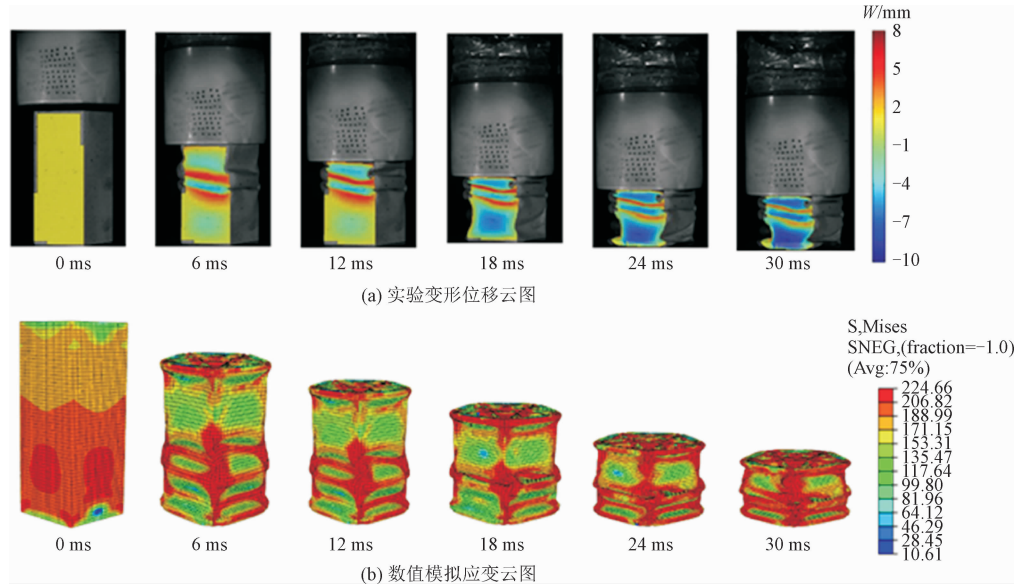


图 5 实验与数值模拟的对比
Fig. 5 Comparison of experiment and numerical simulation

3 几何参数分析

3.1 不同截面拓扑的影响

为了量化星形衍生薄壁管的耐撞性,图 1 中所有同阶的薄壁管采用相同的质量进行数值模拟。以 $t_{5-1} = t_{5-2} = 0.8\text{ mm}$ 为基准,由公式(4)可知, $t_{6-1} = t_{6-2} = 0.75\text{ mm}$, $t_{7-1} = t_{7-2} = 0.72\text{ mm}$, $t_{8-1} = t_{8-2} = 0.7\text{ mm}$ 。由式(5)~式(6)可知, $t_{5-4} = t_{5-5} = 0.7\text{ mm}$, $t_{6-4} = t_{6-5} = 0.72\text{ mm}$, $t_{7-4} = t_{7-5} = 0.7\text{ mm}$, $t_{8-4} = t_{8-5} = 0.68\text{ mm}$ 。基于等质量的设计原则,以二阶等壁厚星形衍生薄壁管 P-P₁-P₂为最初构型,依据式(7)计算内部填充子结构的壁厚。即以 $t_{5-3} = 0.8\text{ mm}$ 为基准,由式(7)可知, $t_{6-3} = 0.48\text{ mm}$, $t_{7-3} = 0.38\text{ mm}$, $t_{8-3} = 0.34\text{ mm}$ 。随着多边形边数的增加,二阶多边形基星形衍生薄壁管结构的壁厚由外到内逐渐变薄,模型呈现出一种正梯度壁厚变化。图 6 给出了一阶与二阶的不同拓扑星形衍生薄壁管的力-位移曲线。显然,在质量相同的情况下,内部结构相同的圆管基及多边形基薄

壁管的力-位移曲线无较大的差异。另外,曲线上每一个波峰或波谷,都代表了一个新的褶皱的形成。随着多边形边数的增加,更容易生成明显交替的波峰波谷,这说明多边形边数的增加降低了结构的稳定性。其次,随着多边形边数的增加,一阶薄壁管与二阶薄壁星形衍生薄壁管之间力-位移曲线的差值变得越来越小。一阶与二阶星形衍生薄壁管 O-O₁, C-O₁, O-O₁-O₂ 和 C-O₁-O₂ 的力位移曲线几乎重合。这种现象的原因可能是随着多边形边数的增加,薄壁结构内部孔径 r 越来越大,内部填充子结构的壁厚也随之变薄。图 6(a)中 P-P₁-P₂与 C-P₁-P₂的力-位移曲线不同于其他各类结构,在经历初始峰值力后,其力值并无明显的下降,而是均匀的产生交替变化的波峰波谷,出现这种现象的原因是薄壁管 P-P₁-P₂与 C-P₁-P₂质量分布的比较均匀,出现了稳定的渐进屈曲模式,形成稳定的塑性铰,所以曲线无较大的变化。其余各类结构都是在经历一个较大初始峰值力后,曲线下降随后形成稳定的屈曲模式,这是由于其他结构质量分布及截面拓扑的差异所致。

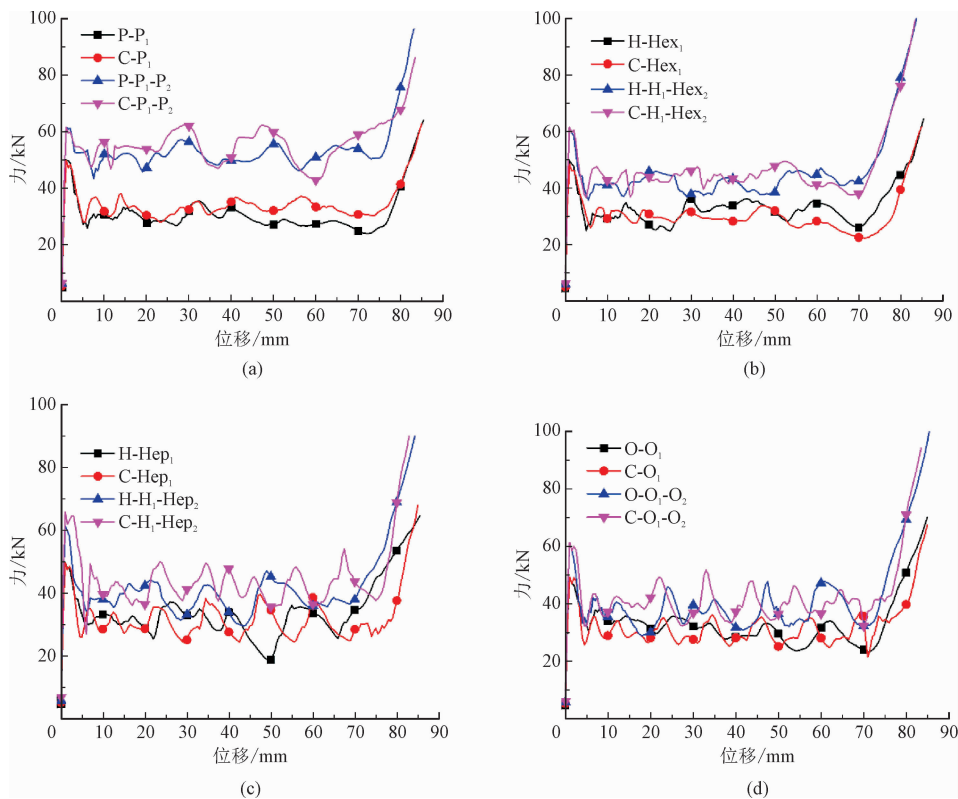


图6 不同截面拓扑薄壁管的力位移曲线

Fig. 6 Force-displacement curves of thin-walled tubes with different cross-sectional topology

3.2 厚度梯度的影响

为了研究厚度梯度对星形衍生薄壁管能量吸收能力的影响,本研究将其厚度设计为负梯度。即在整体模型质量不变化的前提下,以二阶等壁厚星形衍生薄壁管 $O-O_1-O_2$ 为最初构型,依据式(7)计算内部填充子结构的壁厚。即以 $t_{8.3} = 0.68 \text{ mm}$ 为基准,由式(7)可知, $t_{5.3} = 1.6 \text{ mm}$, $t_{6.3} = 0.97 \text{ mm}$, $t_{7.3} = 0.77 \text{ mm}$ 。正负梯度下二阶薄壁管的力-位移曲线如图7所示。

从图7中能够看出,负梯度二阶薄壁管结构的力-位移曲线明显高于正梯度结构,尤其是薄壁管 $H-H_1-Hep_2$ 与 $C-H_1-Hep_2$;这表明负梯度壁厚的设计可以提高结构的耐撞性。负梯度结构耐撞性的提升主要与结构梯度分布及质量的增加相关。这是因为负梯度结构只改变了模型的壁厚,其拓扑结构并未发生变化,产生塑性铰的数目也不会发生明显变化。负梯度下的薄壁管 $P-P_1-P_2$ 与 $C-P_1-P_2$,其力位移曲线变化略有不同,在经历第一个峰值后,承载力并未下降,而是逐渐上升至屈服,曲线上波峰波谷的数量也少于正梯度,产生这种现象的原因可能是改变厚

度梯度,薄壁管 $P-P_1-P_2$ 与 $C-P_1-P_2$ 的质量分布变得不均匀,内部结构厚度较大不利于褶皱的形成,从而影响了其渐进屈曲模式的形成。

3.3 不同结构的比吸能及平均压缩力图

图8(a)给出了正梯度星形衍生薄壁管的比吸能(specific energy absorption, SEA)^[6,11]及平均压缩力(mean compression force, MCF)^[6,11]。图8(a)表明,薄壁管 $P-P_1-P_2$ 与 $C-P_1-P_2$ 的比吸能明显高于其对应的一阶结构的比吸能;而其他不同阶薄壁管的比吸能差别不大。另外, $C-P_1$ 的平均压缩力(MCF)高于 $P-P_1$,而其他一阶结构圆管基星形衍生薄壁管的平均压缩力(MCF)低于其对应多变形基星形衍生薄壁管。相反,二阶圆管基星形结构的比吸能及平均压缩力都高于其对应的多边形基星形衍生薄壁管。

图8(b)给出了负梯度下星形衍生薄壁管的比吸能(SEA)及平均压缩力(MCF)的对比图。从图8中能够看出负梯度设计下的比吸能及平均压缩力均高于正梯度的设计,随着内部填充多边形边数的增加,正负梯度间的差值在逐渐减小。在满足初始峰值力的要求下,适当改变星形薄壁管的梯度设计能够提高其耐撞性。

chinaXiv:202303.00378v1

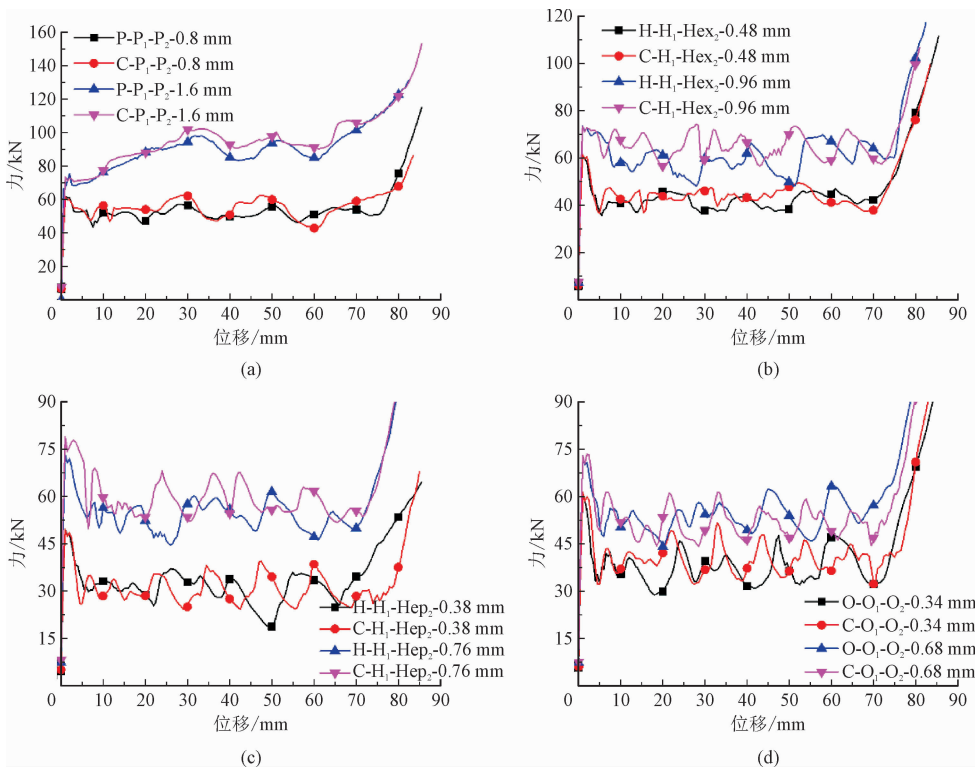


图 7 正负梯度下薄壁管的力-位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curve of thin-walled tube with positive and negative gradients

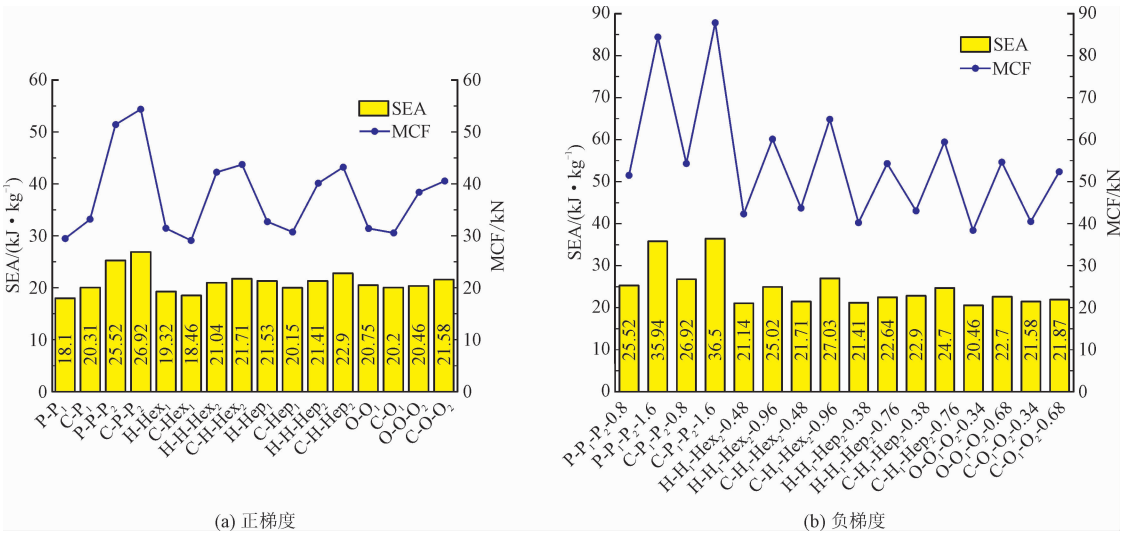


图 8 不同星形衍生薄壁管的 SEA 及 MCF 图

Fig. 8 SEA and MCF of different thin-walled structures

4 结 论

不同的拓扑结构会对星形衍生薄壁管的能量吸收能力产生较大的影响,本研究探讨了不同截面拓扑、壁厚梯度对星形衍生薄壁管耐撞性的影响,采用实验与有限元结合的方法验证了有限元模型的有效

性,随后对不同星形衍生薄壁管进行了数值模拟,分析了不同参数对其能力吸收能力的影响,得到了以下结论。

1)一阶及二阶星形衍生薄壁管,随着填充多边形的边数增加,力-位移曲线间的差值会变得越来越小。同时,薄壁管 P-P₁-P₂ 与 C-P₁-P₂ 的比吸能与平均压缩力明显高于其他星形衍生薄壁管。

2)负梯度星形衍生薄壁管的力-位移曲线明显高于正梯度。在满足耐撞性要求且不改变结构拓扑形态下,这是提升星形衍生薄壁管的耐撞性一种可行的方法。

3)薄壁管 $P-P_1-P_2$, $C-P_1-P_2$ 的比吸能 (SEA) 及平均压缩力 (MCF) 明显优于其他同类星形衍生薄壁管。

参考文献:

- [1] SEVERSON K J, PARENT D P. Train-to-train impact test of crash energy management passenger rail equipment [C]//Proceedings of IMECE 2006. Cambridge: Volpe National Transportation Systems Center, 2006.
- [2] ZHANG X, CHENG G. A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns [J]. International journal of impact engineering, 2007, 34 (11) : 1739-1752.
- [3] 王根伟, 刘冕, 宋辉, 等. 冲击载荷下径向密度排布对泡沫金属力学性能影响的研究 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40 (7) : 071401-1-071401-13.
- WANG Genwei, LIU Mian, SONG Hui, et al. Effect of radial density distribution on mechanical properties of foamed metal under impact load [J]. Explosion and shock waves, 2020, 40 (7) : 071401-1-071401-13 (in Chinese).
- [4] 王根伟, 王江龙. 负梯度闭孔泡沫金属的力学性能分析 [J]. 固体力学学报, 2017, 38 (1) : 86-92.
- WANG Genwei, WANG Jianglong. Mechanical properties analysis of negative gradient closed-cell foamed metal [J]. Chinese journal of solid mechanics, 2017, 38 (1) : 86-92 (in Chinese).
- [5] CHEN W, WIERZBICKI T. Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption [J]. Thin-walled structures, 2001, 39 : 287-306.
- [6] WIERZBICKI T, ABRAMOWICZ W. On the crushing mechanics of thin-walled structures [J]. Journal of applied mechanics, 1983, 50 : 727-734.
- [7] ZHANG X, CHENG G, ZHANG H. Theoretical prediction and numerical simulation of multi-cell square thin-walled structures [J]. Thin-walled structures, 2006, 44 (11) : 1185-1191.
- [8] MA J, HOU D, CHEN Y, et al. Quasi-static axial crushing of thin-walled tubes with a kite-shape rigid origami pattern; Numerical simulation [J]. Thin-walled structures, 2016, 100 : 38-47.
- [9] YANG K, XU S Q, SHEN J H, et al. Energy absorption of thin-walled tubes with pre-folded origami patterns; Numerical simulation and experimental verification [J]. Thin-walled structures, 2016, 103 : 33-44.
- [10] TANG Z, LIU S, ZHANG Z. Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell column [J]. Thin-walled structures, 2013, 62 : 75-84.
- [11] LIU W, LIN Z, WANG N, et al. Dynamic performances of thin-walled tubes with star-shaped cross section under axial impact [J]. Thin-walled structures, 2016, 100 : 25-37.
- [12] WU Suzhen, ZHENG Gang, SUN Guangyong, et al. On design of multi-cell thin-wall structures for crash worthiness [J]. International journal of impact engineering, 2016, 88 : 102-117.

(编辑 张璐)